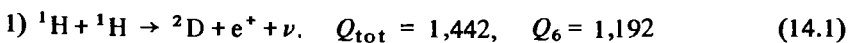


## § 14. Горение водорода, дейтерия и гелия

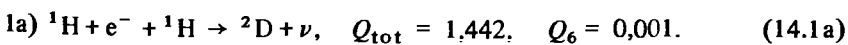
Стадия горения водорода является самой длительной в жизни звезды. Это связано с большим начальным обилием водорода в звездах ( $\sim 70\%$  по массе) и большой калорийностью водорода при превращении его в гелий ( $\sim 0,7\% mc^2$ ), когда выделяется  $\sim 70\%$  энергии, получаемой при превращении водорода в самый стабильный элемент  ${}^56\text{Fe}$ . Фотонная светимость звезд на главной последовательности, где горит водород, как правило, меньше, чем на последующих стадиях эволюции, а их нейтринная светимость значительно меньше, ввиду того, что центральные температуры не превышают  $\sim 4 \cdot 10^7$  К. Поэтому звезды главной последовательности являются самыми распространенными звездами в Галактике и во всей вселенной (см. гл. 9).

Выделение энергии на грамм при горении гелия примерно на порядок меньше, чем при горении водорода, а светимость таких звезд значительно выше. Вследствие этого время жизни и число их в Галактике значительно меньше, чем звезд главной последовательности. Тем не менее благодаря большой светимости таких звезд, которые являются гигантами и сверхгигантами, свойства их хорошо изучены. Помимо медленного горения, в звездах возможно развитие тепловых вспышек, когда происходит быстрое, так называемое взрывное горение при больших температурах  $T_9 \sim 1$ . Это может происходить на поздних стадиях эволюции, а также в веществе, аккрецирующем на белые карлики и нейтронные звезды.

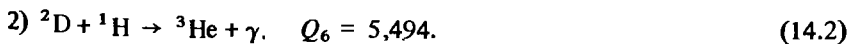
а) Протон-протонная реакция и горение дейтерия. Горение водорода с образованием гелия требует превращения двух протонов в два нейтрона путем захвата электронов или испускания позитронов, с одновременным излучением нейтрино. Такие превращения происходят по реакциям слабого взаимодействия, которые (см. гл. 5) идут значительно медленнее ядерных реакций, связанных с сильным взаимодействием. Слияние двух протонов с образованием дейтерия является первой реакцией протон-протонного цикла, действующего в звездах с массой  $M \leq M_\odot$ , где центральные температуры не превышают  $\sim 1,5 \cdot 10^7$  К. Рассмотрим цепочки pp-цикла. Сначала идут реакции [361, 359, 134]



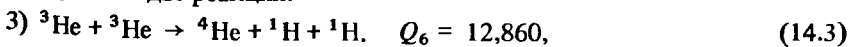
или



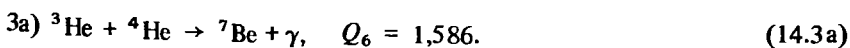
На Солнце и в более массивных звездах реакция 1) гораздо вероятнее, чем 1a). Дейтерий горит в реакции



${}^3\text{He}$  вступает в две реакции:



или



Преобразование  ${}^7\text{Be}$  в  ${}^4\text{He}$  происходит двумя способами:

$$\begin{aligned} 3a_1) \quad & {}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu, \quad Q_{\text{tot}} = 0,862, \quad Q_6 = 0,049, \\ & {}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}, \quad Q_6 = 17,348, \end{aligned} \quad (14.3a_1)$$

или

$$\begin{aligned} 3a_2) \quad & {}^7\text{Be} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma, \quad Q_6 = 0,137, \\ & \left. \begin{aligned} & {}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu \\ & {}^8\text{Be}^* \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \end{aligned} \right\} Q_{\text{tot}} = 18,07, \quad Q_6 = 10,69. \end{aligned} \quad (14.3a_2)$$

Здесь  $Q_{\text{tot}}$  — полная энергия на реакцию (в МэВ),  $Q_6$  — то же за вычетом энергии улетающего нейтрино. Полное энерговыделение в МэВ при образовании одного ядра гелия для различных цепочек составляет

$$Q_{\text{pp}} = \begin{cases} 26,23 & (1 + 2 + 3), \\ 23,85 & (1a + 2 + 3) \\ 25,67 & (1 + 2 + 3a + 3a_1), \\ 24,48 & (1a + 2 + 3a + 3a_1) \\ 19,1 & (1 + 2 + 3a + 3a_2), \\ 17,91 & (1a + 2 + 3a + 3a_2). \end{cases} \quad (14.4)$$

Соотношения между различными каналами зависят от физических условий в звездах. На Солнце основной является реакция  $(1 + 2 + 3)$  и  $Q_{\text{pp}} = 26,2$  МэВ. Скорость pp-реакции определяется самым медленным звеном (14.1) и пропорциональна (см. (13.4)) величине [389]

$$\begin{aligned} N_A \langle {}^1\text{H p} \rangle &= 3,82 \cdot 10^{-15} T_9^{-2/3} \exp(-3,380/T_9^{1/3}) \times \\ &\times (1 + 0,123 T_9^{1/3} + 1,09 T_9^{2/3} + 0,938 T_9) \quad (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}). \end{aligned} \quad (14.5)$$

Скорость энерговыделения для  $(1 + 2 + 3)$ , согласно (13.16) равна

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{pp}} &= 9,6487 \cdot 10^{17} \frac{x_{\text{H}}^2}{2} \rho N_A \langle {}^1\text{H p} \rangle \frac{Q_{\text{pp}}}{2} = \\ &= 6,32 \cdot 10^{18} \left( \frac{Q_{\text{pp}}}{26,2} \right) x_{\text{H}}^2 \rho N_A \langle {}^1\text{H p} \rangle \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \end{aligned} \quad (14.6)$$

В молодых звездах, не достигших главной последовательности, где температура недостаточна для горения водорода, может идти реакция горения дейтерия или  ${}^3\text{He}$ . Скорость и энерговыделение реакции (14.2) равны [389]

$$\begin{aligned} N_A \langle {}^2\text{D p} \rangle &= 2,24 \cdot 10^3 T_9^{-2/3} \exp(-3,72/T_9^{1/3}) \times \\ &\times (1 + 0,112 T_9^{1/3} + 3,38 T_9^{2/3} + 2,65 T_9) \quad (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}), \end{aligned} \quad (14.7)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{{}^2\text{D p}} &= 9,6487 \cdot 10^{17} \frac{x_{2\text{D}} x_{\text{H}}}{2} \rho N_A \langle {}^2\text{D p} \rangle Q_6 = \\ &= 2,65 \cdot 10^{18} x_{2\text{D}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle {}^2\text{D p} \rangle \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \end{aligned} \quad (14.8)$$

Аналогично для реакции (14.3) имеем [361]

$$N_A \langle {}^3\text{He} {}^3\text{He} \rangle = 5,96 \cdot 10^{10} T_9^{-2/3} \exp(-12,276/T_9^{1/3}) \times \\ \times (1 + 0,034 T_9^{1/3} - 0,199 T_9^{2/3} - 0,047 T_9 + 0,032 T_9^{4/3} + \\ + 0,019 T_9^{5/3}) \text{ (см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}), \quad (14.9)$$

$$\epsilon_{\text{He}^3\text{He}} = 9,6487 \cdot 10^{17} \frac{x_{\text{He}^3}^2}{18} \rho N_A \langle {}^3\text{He} {}^3\text{He} \rangle Q_6 = \\ = 6,893 \cdot 10^{17} x_{\text{He}^3}^2 \rho N_A \langle {}^3\text{He} {}^3\text{He} \rangle \text{ (эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \quad (14.10)$$

Для учета горения  ${}^2\text{D}$  и  ${}^3\text{He}$  при расчете эволюции звезд, идущих к главной последовательности, нужно рассматривать все три реакции (14.5)–(14.10), причем в (14.6) положить  $Q_6 = 1,192$  вместо  $Q_{pp}/2$ . Когда вблизи главной последовательности концентрации  ${}^2\text{D}$  и  ${}^3\text{He}$  достигнут малых стационарных значений, скорость энерговыделения будет определяться формулами (14.5), (14.6).

б) Углеродный и другие циклы горения водорода. При наличии  ${}^{12}\text{C}$  и более тяжелых элементов и при достаточно высокой температуре водород превращается в гелий по различным цепочкам реакций, в которых тяжелые элементы играют роль катализаторов. Самый низкотемпературный CN цикл имеет вид [229, 361, 389, 259, 182]:

- 1)  ${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma, \quad Q_6 = 1,944 \text{ (}\sim 10^6 \text{ лет)},$
- 2)  ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu, \quad Q_{\text{tot}} = 2,22, \quad Q_6 = 1,51 \text{ (}\tau_{1/2} = 10 \text{ мин)},$
- 3)  ${}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma, \quad Q_6 = 7,551 \text{ (}\sim 3 \cdot 10^6 \text{ лет)},$
- 4)  ${}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma, \quad Q_6 = 7,298 \text{ (}\sim 3 \cdot 10^8 \text{ лет)},$
- 5)  ${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu, \quad Q_{\text{tot}} = 2,76, \quad Q_6 = 1,76 \text{ (}\tau_{1/2} = 12,4 \text{ с)},$
- 6)  ${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}, \quad Q_6 = 4,966 \text{ (}\sim 10^5 \text{ лет)}.$

В скобках приведены периоды полураспада  $\tau_{1/2}$  и характерные времена реакций для Солнца [229]. По подсчетам [361] энерговыделение в углеродном цикле за вычетом энергии нейтрино при образовании одного ядра гелия равно

$$Q_{\text{CN}} = 24,97 \text{ МэВ}. \quad (14.12)$$

Скорость реакции на Солнце определяется самой медленной реакцией цепочки 4) из (14.11); она равна [361]

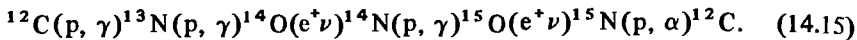
$$N_A \langle {}^{14}\text{N p} \rangle = \left\{ 5,08 \cdot 10^7 T_9^{-2/3} \exp \left[ -\frac{15,228}{T_9^{1/3}} - \left( \frac{T_9}{3,090} \right)^2 \right] \times \right. \\ \times (1 + 0,027 T_9^{1/3} - 0,778 T_9^{2/3} - 0,149 T_9 + 0,261 T_9^{4/3} + \\ + 0,127 T_9^{5/3}) + 2,28 \cdot 10^3 T_9^{-3/2} \exp(-3,011/T_9) + \\ \left. + 1,65 \cdot 10^4 T_9^{1/3} \exp(-12,007/T_9) \right\} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}. \quad (14.13)$$

Скорость энерговыделения есть

$$\epsilon_{\text{CN}} = 4,302 \cdot 10^{17} x_{14\text{N}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle {}^{14}\text{N p} \rangle \text{ эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (14.14)$$

Здесь использовано  $Q_6$  из (14.12). Реакции CN-цикла преобладают над pp-циклом примерно для звезд, массивнее Солнца. С ростом температуры преодолевается более высокий кулоновский барьер и реализуется преимущество этой реакции, связанное с тем, что реакции бета-распада 2) и 5) в (14.11) идут здесь гораздо быстрее, чем pp-реакция (14.1). По мере протекания реакций CN-цикла происходит превращение почти всего углерода в азот, ввиду медленности реакции 4) из (14.11).

При температуре  $T \geq 2 \cdot 10^8$  К реакция 4), а также 1), 3), 6) из (14.11) становятся быстрее реакции бета-распада 2), которая начинает лимитировать скорость цикла. В этом случае захват протона ядром  $^{13}\text{N}$  приводит к другому циклу, называемому горячим CNO-циклом



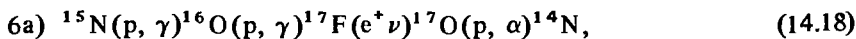
Здесь использована более компактная запись реакций, принятая в ядерной физике. Время полураспада  $^{14}\text{O}$  в этом цикле равно 72 с [232] и медленная реакция 2) из (14.11) перестает лимитировать весь цикл. Скорость реакции  $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$  рассчитана в [481]:

$$N_A \langle ^{13}\text{Np} \rangle = \left\{ 3,35 \cdot 10^7 T_9^{-2/3} \exp[-15,202/T_9^{1/3} - (T_9/1,072)^2] \times (1 + 0,027 T_9^{1/3} + 0,90 T_9^{2/3} + 0,173 T_9 + 4,61 T_9^{4/3} + 2,26 T_9^{5/3}) + (3,02 \cdot 10^5 / T_9^{2/3}) \exp\left(-\frac{6,348}{T_9}\right) \right\} \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}. \quad (14.16)$$

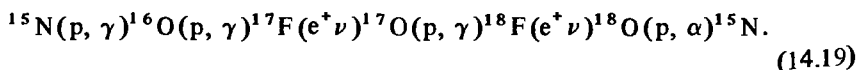
В этой реакции выделяется энергия  $Q_6 = 4,626$  МэВ и энерговыделение на грамм есть

$$\epsilon_{13\text{Np}} = 3,433 \cdot 10^{17} x_{13\text{N}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle ^{13}\text{Np} \rangle \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \quad (14.17)$$

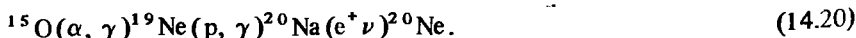
Наряду с реакцией 6) из (14.11) ядро  $^{15}\text{N}$  может вступить в реакцию  $^{15}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{16}\text{O}$ . Воспроизводство  $^{16}\text{O}$  приводит к появлению новой цепочки. Наряду с 6) идет звено реакций



после которого следует реакция 4) из (14.11), а также новый цикл



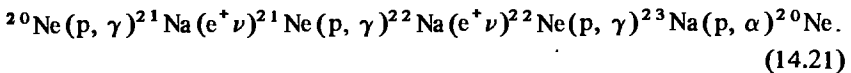
При высоких температурах, наряду с 5) в (14.11) проходит звено реакций [462]



Значения  $N_A \langle \sigma v \rangle$ ,  $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$  и выделение тепла на реакцию  $Q_6$ , МэВ для двух реакций захвата

$T (10^9 \text{ К})$	$N_A \langle {}^{15}\text{O} \alpha \rangle \gamma$	$N_A \langle {}^{19}\text{Ne p} \rangle \gamma$	$T (10^9 \text{ К})$	$N_A \langle {}^{15}\text{O} \alpha \rangle \gamma$	$N_A \langle {}^{19}\text{Ne p} \rangle \gamma$
0,1	5,02 (-25)	1,01 (-11)	1,5	3,57	31,82
0,16	—	3,47 (-9)	2,0	17,6	78,7
0,2	8,81 (-13)	3,40 (-8)	3,0	99,2	167,0
0,4	7,42 (-7)	1,64 (-4)	4,0	267	—
0,6	1,80 (-4)	4,82 (-2)	5,0	573	—
0,8	1,01 (-2)	0,814	10,0	2,36 (+3)	—
1,0	0,129	4,16			
$Q_6$	3,53	2,19	$Q_6$	3,53	2,19

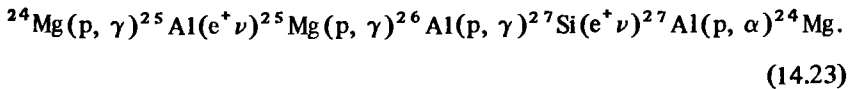
Благодаря производству  ${}^{20}\text{Ne}$  появляется катализатор для протекания NeNa-цикла [608]



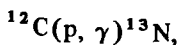
Протекание реакции производства  ${}^{24}\text{Mg}$  (наряду с последней реакцией (14.21))



приводит к появлению еще более высокотемпературного MgAl-цикла горения водорода [361, 389]:



При  $T \geq 2 \cdot 10^8 \text{ К}$ , когда время реакции 4) перестает лимитировать горение, требуется учет каждой реакции в отдельности из (14.11), а также из (14.15)–(14.23) для определения концентраций элементов и скорости выделения энергии. Для реакций  $\alpha$  и  $\text{p}$  захвата из (14.20) скорости рассчитаны в [462]. Так как формулы типа (13.27) и (13.37) здесь весьма громоздки из-за наличия большого числа резонансов, приведем табл. 13 из [462], где приведены значения  $N_A \langle \sigma v \rangle$  как функции температуры. Выделение тепла в этих реакциях получено по данным [135]. Для реакций ( $\text{p}, \gamma$ ) из (14.11) имеем [361]



$$Q_6 = 1,944,$$

$$N_A \langle {}^{12}\text{Cp} \rangle = \left\{ 2,04 \cdot 10^7 T_9^{-2/3} \exp \left[ -\frac{13,690}{T_9^{1/3}} - \left( \frac{T_9}{1,500} \right)^2 \right] \times \right. \\ \times (1 + 0,03 T_9^{1/3} + 1,19 T_9^{2/3} + 0,254 T_9 + 2,06 T_9^{4/3} + \\ \left. + 1,12 T_9^{5/3} \right) + 1,08 \cdot 10^5 T_9^{-3/2} \exp \left( -\frac{4,925}{T_9} \right) + \\ \left. + 2,15 \cdot 10^5 T_9^{-3/2} \exp \left( -\frac{18,179}{T_9} \right) \right\} \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}, \quad (14.24)$$

$$\epsilon_{12\text{Cp}} = 1,563 \cdot 10^{17} x_{12\text{C}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle {}^{12}\text{Cp} \rangle \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1});$$

$${}^{13}\text{C}(\text{p}, \gamma) {}^{14}\text{N}, \quad Q_6 = 7,551,$$

$$N_A \langle {}^{13}\text{Cp} \rangle = \left\{ 8,01 \cdot 10^7 T_9^{-2/3} \exp \left[ -\frac{13,717}{T_9^{1/3}} - \left( \frac{T_9}{2,0} \right)^2 \right] \times \right. \\ \times (1 + 0,03 T_9^{1/3} + 0,958 T_9^{2/3} + 0,204 T_9 + 1,39 T_9^{4/3} + \\ \left. + 0,753 T_9^{5/3} \right) + 1,35 \cdot 10^6 T_9^{-3/2} \exp (-5,978/T_9) + \\ \left. + 2,66 \cdot 10^5 T_9^{-3/2} \exp (-11,987/T_9) + \right. \\ \left. + 2,26 \cdot 10^6 T_9^{-3/2} \exp (-13,463/T_9) \right\} \text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (14.25)$$

$$\epsilon_{13\text{Cp}} = 5,604 \cdot 10^{17} x_{13\text{C}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle {}^{13}\text{Cp} \rangle \quad (\text{эрг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}).$$

Значение  $N_A \langle 01 \rangle$  для реакции  ${}^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma) {}^{15}\text{O}$  дано в (14.13), а  $\epsilon_{14\text{Np}}$  получается из  $\epsilon_{\text{CN}}$  в (14.14) с коэффициентом  $5,030 \cdot 10^{17}$  вместо  $4,302 \cdot 10^{17}$ . Имеем также

$${}^{15}\text{N}(\text{p}, \alpha) {}^{12}\text{C}, \quad Q_6 = 4,966$$

$$N_A \langle {}^{15}\text{Np} \rangle_{\alpha} = 8,16 \cdot 10^{11} T_9^{-2/3} \exp \left[ -\frac{15,25}{T_9^{1/3}} - \left( \frac{T_9}{0,522} \right)^2 \right] \times \\ \times (1 + 0,027 T_9^{1/3} + 6,74 T_9^{2/3} + 1,29 T_9) + \\ + 1,29 \cdot 10^8 T_9^{-3/2} \exp \left( -\frac{3,676}{T_9} \right) + \\ + 3,14 \cdot 10^8 \exp \left( -\frac{7,974}{T_9} \right) (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}), \quad (14.26)$$

$$\epsilon_{15\text{Np}\alpha} = 3,194 \cdot 10^{17} x_{15\text{N}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle {}^{15}\text{Np} \rangle_{\alpha} \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}).$$

Для реакций из (14.18), (14.19) имеем [361]

$$^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}, \quad Q_6 = 12,128,$$

$$N_A \langle ^{15}\text{Np} \rangle_\gamma = \left\{ 9,78 \cdot 10^8 T_9^{-2/3} \exp \left[ -\frac{15,25}{T_9^{1/3}} - \left( \frac{T_9}{0,45} \right)^2 \right] \times \right. \\ \times (1 + 0,027 T_9^{1/3} + 0,219 T_9^{2/3} + 0,042 T_9 + 6,83 T_9^{4/3} + \\ \left. + 3,32 T_9^{5/3} \right) + 1,11 \cdot 10^4 T_9^{-3/2} \exp \left( -\frac{3,328}{T_9} \right) + \\ \left. + 1,49 \cdot 10^4 T_9^{-3/2} \exp \left( -\frac{4,665}{T_9} \right) + 3,80 \cdot 10^6 T_9^{-3/2} \exp \left( -\frac{11,048}{T_9} \right) \right\} \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}, \quad (14.27)$$

$$\epsilon_{^{15}\text{Np}\gamma} = 7,801 \cdot 10^{17} x_{^{15}\text{N}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle ^{15}\text{Np} \rangle_\gamma \quad (\text{эпр} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1});$$

$$^{16}\text{O}(p, \gamma)^{17}\text{F}, \quad Q_6 = 0,601,$$

$$N_A \langle ^{16}\text{Op} \rangle = 1,5 \cdot 10^8 T_9^{-2/3} \{ 1 + 2,13 [ 1 - \\ - \exp(-0,728 T_9^{2/3}) ] \}^{-1} \exp \left( -\frac{16,692}{T_9^{1/3}} \right) (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}), \quad (14.28)$$

$$\epsilon_{^{16}\text{Op}} = 3,624 \cdot 10^{16} x_{^{16}\text{O}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle ^{16}\text{Op} \rangle \quad (\text{эпр} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1});$$

$$^{17}\text{O}(p, \alpha)^{14}\text{N}, \quad Q_6 = 1,193,$$

$$N_A \langle ^{17}\text{Op} \rangle_\alpha = \left\{ 1,53 \cdot 10^7 T_9^{-2/3} \exp \left[ -\frac{16,712}{T_9^{1/3}} - \left( \frac{T_9}{0,565} \right)^2 \right] \times \right. \\ \times (1 + 0,025 T_9^{1/3} + 5,39 T_9^{2/3} + 0,940 T_9 + 13,5 T_9^{4/3} + \\ \left. + 5,98 T_9^{5/3} \right) + 2,92 \cdot 10^6 T_9 \exp \left( -\frac{4,247}{T_9} \right) \right\} \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}, \quad (14.29)$$

$$\epsilon_{^{17}\text{Op}\alpha} = 6,771 \cdot 10^{16} x_{^{17}\text{O}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle ^{17}\text{Op} \rangle_\alpha \quad (\text{эпр} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1});$$

$$^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}, \quad Q_6 = 5,609,$$

$$N_A \langle ^{17}\text{Op} \rangle_\gamma = \left\{ 7,97 \cdot 10^7 T_{9A}^{5/6} T_9^{-3/2} \exp \left( -\frac{16,712}{T_{9A}^{1/3}} \right) + \right. \\ \left. + 1,51 \cdot 10^8 T_9^{-2/3} \exp \left( -\frac{16,712}{T_9^{1/3}} \right) \times (1 + 0,025 T_9^{1/3} - \right.$$

$$-0,051 T_9^{2/3} - 8,82 \cdot 10^{-3} T_9) + 1,56 \cdot 10^5 T_9^{-1} \times \\ \times \exp\left(-\frac{6,272}{T_9}\right) \left( \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1} \right), \quad (14.30)$$

$$T_{9A} = T_9 (1 + 2,69 T_9)^{-1},$$

$$\epsilon_{17\text{O}p\gamma} = 3,184 \cdot 10^{17} x_{17\text{O}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle {}^{17}\text{O}p \rangle_{\gamma} \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1});$$

$${}^{18}\text{O}(p, \alpha)^{15}\text{N}, \quad Q_6 = 3,980, \quad *$$

$$N_A \langle {}^{18}\text{O}p \rangle_{\alpha} = \left\{ 2,13 \cdot 10^{11} T_9^{-2/3} \exp\left[-\frac{16,729}{T_9^{1/3}} - \left(\frac{T_9}{1,318}\right)^2\right] \times (1 + 0,025 T_9^{1/3} + 1,68 T_9^{2/3} + 0,292 T_9 + 1,86 T_9^{4/3} + \right. \\ \left. + 0,824 T_9^{5/3}) + 9,64 \cdot 10^8 T_9^{-1} \exp\left(-\frac{7,361}{T_9}\right) + \right. \\ \left. + 1,99 \cdot 10^{13} T_9^{-2/3} \exp\left[-\frac{16,729}{T_9^{1/3}} - \left(\frac{T_9}{0,138}\right)^2\right] \times \right. \\ \left. \times (1 + 0,025 T_9^{1/3} + 5,98 T_9^{2/3} + 1,04 T_9 + 30,7 T_9^{4/3} + 13,61 T_9^{5/3}) + \right. \\ \left. + 1,4 \cdot 10^6 T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{1,662}{T_9}\right) + 2,34 \cdot 10^6 T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{2,915}{T_9}\right) \right\} \times \\ \times [1 + 5 \exp(-23,002/T_9)]^{-1} \quad (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}), \quad (14.31)$$

$$\epsilon_{18\text{O}p\alpha} = 2,133 \cdot 10^{17} x_{18\text{O}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle {}^{18}\text{O}p \rangle_{\alpha} \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}).$$

Приведенные выше формулы для (p,  $\gamma$ ) и (p,  $\alpha$ ) реакций справедливы при  $10^{-3} < T_9 < 10$  и при плотностях, при которых пренебрежимо мало электронное экранирование (см. § 17). Неопределенные члены в реакциях (14.29)–(14.31), которые в [361] даны с множителем (от 0 до 1), везде опущены. Величины  $N_A \langle 01 \rangle$  для реакций (p,  $\gamma$ ) и (p,  $\alpha$ ) из (14.21) – (14.23), а также ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ) запишем в виде

$$N_A \langle 01 \rangle = T_9^{-2/3} \exp\left[A - \left(\frac{TAU}{T_9^{1/3}}\right)\right] \times \\ \times (1 + BT_9 + CT_9^2 + DT_9^3) \left( \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1} \right). \quad (14.32)$$



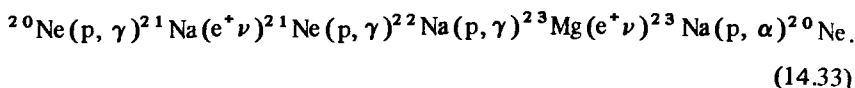
Таблица 14

Параметры  $(p, \gamma)$ ,  $(p, \alpha)$  реакций для формулы (14.32),  $Q_c$  – энергия на реакцию в МэВ,  $T_{\text{обл}}$  – пределы применимости

Реакция	$TAU$	$A$	$B$	$C$	$D$	$Q_c$	$T_{\text{обл}}$
$^{20}\text{Ne}(p, \gamma)^{21}\text{Na}$	19,45	30,94	8,097(-2)	6,555(-1)	-4,272(-1)	2,431	$0 < T_p < 1$
	18,57	28,01	2,428(-1)	-2,336(-2)	1,026(-3)	2,431	$1 < T_p < 10$
$^{21}\text{Ne}(p, \gamma)^{22}\text{Na}$	19,46	31,61	2,391(-1)	-1,850(-2)	6,622(-4)	6,740	$0 < T_p < 10$
$^{22}\text{Ne}(p, \gamma)^{23}\text{Na}$	19,48	31,41	1,802(-1)	-1,303(-2)	4,839(-4)	8,793	$0 < T_p < 10$
$^{23}\text{Na}(p, \alpha)^{20}\text{Ne}$	20,77	30,63	1,585(-2)	1,235(-3)	-1,294(-4)	2,376	$0 < T_p < 10$
$^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Mg}$	20,77	29,97	-6,586(-2)	2,804(-1)	-1,131(-1)	11,692	$0 < T_p < 1$
	22,02	34,04	2,417(-1)	-2,162(-2)	9,298(-4)	11,692	$1 < T_p < 10$
$^{24}\text{Mg}(p, \gamma)^{25}\text{Al}$	22,02	31,54	-3,333(-2)	6,356(-1)	-3,758(-1)	2,270	$0 < T_p < 1$
	21,93	32,58	3,017(-1)	-3,410(-2)	1,671(-3)	2,270	$1 < T_p < 10$
$^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$	22,04	31,32	-8,358(-2)	3,614(-1)	-1,620(-1)	6,307	$0 < T_p < 1$
	23,28	35,59	2,598(-1)	-2,450(-2)	1,097(-3)	6,307	$1 < T_p < 10$
$^{26}\text{Al}(p, \gamma)^{27}\text{Si}$	23,26	31,81	-7,207(-2)	4,040(-1)	-1,990(-1)	7,465	$0 < T_p < 1$
	24,17	35,29	2,528(-1)	-2,510(-2)	1,161(-3)	7,465	$1 < T_p < 10$
$^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$	23,27	28,41	-2,716(-1)	3,533(-1) *	-1,410(-1)	1,600	$0 < T_p < 1$
	25,02	34,08	1,158(-1)	-1,657(-2)	8,537(-4)	1,600	$1 < T_p < 10$

Численные коэффициенты из [638] приведены в табл. 14. Параметры ( $e^+ \nu$ ) распадов: времена полураспадов из [232], полные энергии распадов  $Q_{\text{tot}}$  и средние энергосвечения на реакцию за вычетом энергии нейтрино в МэВ [135, 182] — даны в табл. 15.

Ввиду большого времени бета-распада  $^{22}\text{Na}$  из (14.21), при высокой температуре быстрее может идти другое звено NeNa-цикла [215]



Скорость реакции  $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$  рассчитана в [624]. Имеем

$$N_A \langle ^{22}\text{Na} p \rangle_{\gamma} = 6,55 T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{2,437}{T_9}\right) (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}),$$

$$Q_6 = 7,579, \quad 0 \leq T_9 \leq 1, \quad (14.34)$$

$$\epsilon_{^{22}\text{Na} p} = 3,324 \cdot 10^{17} x_{^{22}\text{Na}} x_{\text{H}} \rho N_A \langle ^{22}\text{Na} p \rangle \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}).$$

Изменение концентрации при наличии бета-распада равно

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} = -\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}. \quad (14.35)$$

Это уравнение, наряду с (13.6), нужно использовать для нахождения концентраций при протекании реакций. Если данный элемент появляется или исчезает в нескольких реакциях, то в правых частях (13.6) или (14.35) стоят

Т а б л и ц а 15

Характеристики бета-распадных реакций в циклах горения водорода

Реакция	$\tau_{1/2}$	$Q_{\text{tot}}$ (МэВ)	$Q_6$ (МэВ)
$^{13}\text{N}(e^+ \nu)^{13}\text{C}$	10 мин	2,22	1,51
$^{14}\text{O}(e^+ \nu)^{14}\text{N}$	72 с	5,145	
$^{15}\text{O}(e^+ \nu)^{15}\text{N}$	124 с	2,76	1,76
$^{17}\text{F}(e^+ \nu)^{17}\text{O}$	70 с	2,76	1,82
$^{18}\text{F}(e^+ \nu)^{18}\text{O}$	110 мин	1,655	
$^{20}\text{Na}(e^+ \nu)^{20}\text{Ne}$	0,38 с	13,89	
$^{21}\text{Na}(e^+ \nu)^{21}\text{Ne}$	23 с	3,55	
$^{22}\text{Na}(e^+ \nu)^{22}\text{Ne}$	2,6 года	2,84	
$^{25}\text{Al}(e^+ \nu)^{25}\text{Mg}$	73 с	4,28	
$^{27}\text{Si}(e^+ \nu)^{27}\text{Al}$	4,1 с	4,81	
$^{23}\text{Mg}(e^+ \nu)^{23}\text{Na}$	12 с	4,06	

суммы по соответствующим реакциям. Скорость выделения тепла при  $\beta^+$  распаде ядер с атомным весом  $A_0$  и весовой концентрацией  $x_0$  равна

$$\epsilon_{\beta^+} = N_A \frac{x_0}{A_0} Q \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} = 6,6880 \cdot 10^{17} \frac{x_0}{A_0} \frac{Q_6}{\tau_{1/2}} \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \quad (14.36)$$

В бета-распадах величина  $\ln 2/\tau_{1/2}$  является аналогом  $(x_1/A_1)\rho N_A \langle 01 \rangle$  в ядерной реакции  $\langle 01 \rangle$ , см. (13.6) и (13.16).

Отметим, что наличие изотопов  $^{13}\text{C}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{25}\text{Mg}$  в рассмотренных выше цепочках реакций, приводит к рождению нейтронов в  $(\alpha, n)$  реакциях [361], что существенно для производства тяжелых элементов в  $s$ -процессах (см. § 16). При рассмотрении взрывного горения водорода необходимо учитывать много других  $(p, \gamma)$  и обратных к ним реакций, помимо рассмотренных выше, которые исследовались в работах [361, 389, 399, 638, 624].

в) **Горение гелия.** Наиболее важной для физики звезд реакцией горения гелия является  $3\alpha$  реакция образования  $^{12}\text{C}$ . Она протекает благодаря тому, что при соединении двух альфа-частиц образуются неустойчивые ядра  $^8\text{Be}$ . В равновесии концентрация ядер  $^8\text{Be}$  определяется формулой, аналогичной (3.3):

$$n_{^8\text{Be}} = n_{\text{He}}^2 \frac{A_{\text{Be}}^{3/2}}{A_{\text{He}}^3} \frac{h^3}{(2\pi m_{\text{u}} kT)^{3/2}} e^{-\frac{Q}{kT}}, \quad (14.37)$$

$$Q = 92 \text{ кэВ.}$$

Реакция образования  $^8\text{Be}$  является резонансной с  $E_r = Q$ . Соединение ядер  $^8\text{Be}$  с альфа-частицами происходит также в виде резонансной реакции со скоростью, определяемой (13.4), (13.36). Для величины  $N_A^2 \langle 012 \rangle$ , характеризующей реакцию слияния трех частиц 0, 1, 2, получаем [389]

$$N_A^2 \langle \alpha\alpha\alpha \rangle = \left\{ 2,79 \cdot 10^{-8} T_9^{-3} \exp\left(-\frac{4,4027}{T_9}\right) + (0 \div 1) \times 1,35 \cdot 10^{-7} T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{24,811}{T_9}\right) \right\} (\text{см}^6 \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}), \quad (14.38)$$

$$Q_6 = 7,275.$$

Количество реакций, протекающих в 1 с в 1 см<sup>3</sup>,  $P_{012}$ , среднее время жизни ядер гелия  $\tau_{3\alpha}(^4\text{He})$  и энергывыделение  $\epsilon_{\alpha\alpha\alpha}$  в  $3\alpha$ -реакции равны [360]

$$P_{012} = \frac{n_0 n_1 n_2}{1 + \Delta_{012}} \langle 012 \rangle = \rho^3 N_A^3 \frac{x_0 x_1 x_2}{A_0 A_1 A_2} \frac{\langle 012 \rangle}{1 + \Delta_{012}} = \frac{1}{384} \rho^3 N_A^3 x_{\text{He}}^3 \langle \alpha\alpha\alpha \rangle \quad (\text{реакций} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}), \quad (14.39)$$

$$\Delta_{012} = \delta_{01} + \delta_{12} + \delta_{02} + 2\delta_{012};$$

$$\frac{1}{\tau_{3\alpha}({}^4\text{He})} = -\frac{1}{n_4\text{He}} \frac{dn_4\text{He}}{dt} = \frac{3P_{3\alpha}}{n_4\text{He}} = \frac{1}{2} n_4^2\text{He} \langle \alpha\alpha\alpha \rangle,$$

$$\epsilon_{\alpha\alpha\alpha} = 9,6487 \cdot 10^{17} \frac{x_0 x_1 x_2}{A_0 A_1 A_2} \frac{\rho^2 N_A^2}{1 + \Delta_{012}} Q_6 \langle 012 \rangle =$$

$$= \frac{9,6487 \cdot 10^{17}}{384} x_4^3\text{He} \rho^2 N_A^2 Q_6 \langle \alpha\alpha\alpha \rangle =$$

$$= 1,828 \cdot 10^{16} x_4^3\text{He} \rho^2 N_A^2 \langle \alpha\alpha\alpha \rangle \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}).$$

При  $T \leq 2,8 \cdot 10^7$  К нерезонансный канал реакции  ${}^8\text{Be}(\alpha, \gamma){}^{12}\text{C}$  становится важнее резонансного. Учет нерезонансной реакции сделан в [510]. Приближенно, с точностью  $\sim 20\%$  ее учет сводится к умножению (14.38) и (14.39) на функцию

$$f_{\text{He}}(T) = \left\{ 0,01 + 0,2 \frac{1 + 4 \exp[-(0,025/T_9)^{3,263}]}{1 + 4 \exp[-(T_9/0,025)^{9,227}]} \right\}^{-1}. \quad (14.40)$$

Скорость реакции  ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$  сравнима со скоростью  $3\alpha$ -реакции так, что при горении гелия образуется  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$ . Их относительное производство зависит от условий, при которых идет реакция, и меняется с массой звезды. При увеличении массы производство  ${}^{16}\text{O}$  растет и может стать больше  ${}^{12}\text{C}$  (см. гл. 9). Имеем для реакции  ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$  [361]

$$N_A \langle {}^{12}\text{C}\alpha \rangle = \left\{ 9,03 \cdot 10^7 T_9^{-2} \frac{(1 + 0,621 T_9^{2/3})^2}{(1 + 0,047 T_9^{2/3})^2} \times \right. \\ \times \exp\left[-\frac{32,120}{T_9^{1/3}} - \left(\frac{T_9}{5,863}\right)^2\right] + 2,74 \cdot 10^7 T_9^{-2/3} \times \\ \times \exp\left(-\frac{32,120}{T_9^{1/3}}\right) + 1,25 \cdot 10^3 T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{27,499}{T_9}\right) + \\ \left. + 1,43 \cdot 10^{-2} T_9^5 \exp\left(-\frac{15,541}{T_9}\right) \right\} \quad (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}), \quad (14.41)$$

$$Q_6 = 7,162,$$

$$\epsilon_{12\text{C}\alpha} = 1,44 \cdot 10^{17} x_{12\text{C}} x_4\text{He} \rho N_A \langle {}^{12}\text{C}\alpha \rangle \quad (\text{эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}).$$

Формулы (14.38)–(14.41) справедливы при  $10^{-3} < T_9 < 10$  в отсутствие электронного экранирования. На стадиях эволюции, предшествующих

Параметры ( $\alpha, \gamma$ ) реакций для формулы (14.32);  $Q_6$  – энергия на реакцию в МэВ,  $T_{обл}$  – пределы применимости

Реакция	TAU	A	B	C	D		$T_{обл}$
$^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$	39,76	41,17	-8,856 (-3)	7,048 (-2)	2,521 (-2)	4,731	$0 < T_9 < 1$
	42,63	49,51	2,217 (-1)	-1,750 (-2)	6,622 (-4)	4,731	$1 < T_9 < 10$
$^{20}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{24}\text{Mg}$	46,77	44,38	2,482 (-2)	-2,855 (-2)	3,987 (-2)	9,315	$0 < T_9 < 1$
	48,75	49,62	1,087 (-1)	-2,975 (-3)	-2,077 (-5)	9,315	$1 < T_9 < 10$
$^{24}\text{Mg}(\alpha, \gamma)^{28}\text{Si}$	53,32	47,06	1,344 (-2)	1,954 (-3)	7,228 (-3)	9,986	$1 < T_9 < 1$
	54,77	50,89	6,885 (-2)	3,133 (-3)	-3,459 (-4)	9,986	$1 < T_9 < 10$
$^{28}\text{Si}(\alpha, \gamma)^{32}\text{S}$	59,49	49,60	1,270 (-2)	4,133 (-3)	2,791 (-3)	6,949	$0 < T_9 < 1$
	61,02	53,60	6,340 (-2)	2,541 (-3)	-2,900 (-4)	6,969	$1 < T_9 < 10$
$^{32}\text{S}(\alpha, \gamma)^{36}\text{Ar}$	65,37	52,09	1,821 (-2)	-5,033 (-3)	5,584 (-3)	6,642	$0 < T_9 < 1$
	66,69	55,41	4,913 (-2)	4,637 (-3)	-4,067 (-4)	6,642	$1 < T_9 < 10$
$^{36}\text{Ar}(\alpha, \gamma)^{40}\text{Ca}$	71,01	54,48	2,676 (-2)	-3,300 (-2)	3,361 (-2)	7,041	$0 < T_9 < 1$
	78,27	70,11	1,458 (-1)	-1,069 (-2)	3,790 (-4)	7,041	$1 < T_9 < 10$
$^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$	76,44	56,80	1,650 (-2)	5,973 (-3)	-3,889 (-4)	5,128	$0 < T_9 < 10$
$^{44}\text{Ti}(\alpha, \gamma)^{48}\text{Cr}$	81,66	56,98	-8,364 (-2)	2,085 (-1)	-7,477 (-2)	7,694	$0 < T_9 < 1$
	81,23	60,18	1,066 (-1)	-1,102 (-2)	5,324 (-4)	7,694	$1 < T_9 < 10$
$^{48}\text{Cr}(\alpha, \gamma)^{52}\text{Fe}$	86,74	62,93	1,212 (-1)	-1,340 (-2)	-5,335 (-4)	7,943	$0 < T_9 < 1$
	81,42	53,00	6,325 (-2)	-5,671 (-3)	2,848 (-4)	7,943	$1 < T_9 < 10$
$^{52}\text{Fe}(\alpha, \gamma)^{56}\text{Ni}$	91,67	62,22	7,846 (-2)	-7,430 (-3)	3,723 (-4)	8,001	$0 < T_9 < 10$
$^{56}\text{Ni}(\alpha, \gamma)^{60}\text{Zn}$	96,48	64,42	1,549 (-2)	-4,664 (-3)	4,888 (-3)	2,704	$0 < T_9 < 1$
	104,92	79,65	8,188 (-2)	-2,885 (-3)	5,206 (-5)	2,704	$1 < T_9 < 10$

взрыву сверхновой [363], а также при взрывном горении гелия важны другие реакции ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ) захвата. Если величины  $N_A \langle \sigma v \rangle$  записать в виде (14.32), то коэффициенты для некоторых реакций из [638] приведены в табл. 16. В [399, 638] приведены параметры различных ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ), ( $\alpha$ ,  $n$ ) и ( $\alpha$ ,  $p$ ), а также обратных к ним реакций, участвующих во взрывном горении гелия.

### § 15. Реакции с тяжелыми ядрами при высоких температурах

На поздних стадиях эволюции массивных звезд, а также при взрывах ведущих к вспышке сверхновой, в центральных областях звезды происходят реакции непосредственного слияния тяжелых ядер. Энерговыведение в реакциях горения  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{28}\text{Si}$  сравнимо с энерговыведением в  $3\alpha$  реакции, однако мощное нейтринное излучение из-за высокой температуры делает время жизни звезды на стадии горения  $^{12}\text{C}$  или  $^{16}\text{O}$  много меньшим, чем на стадии горения  $^4\text{He}$ . В связи с малым временем жизни вероятность обнаружения таких звезд также мала. В настоящее время нельзя с уверенностью указать на звезду в спокойном состоянии, излучающую энергию за счет горения  $^{12}\text{C}$  или других тяжелых элементов.

В тех случаях, когда пренебрежимо экранирование кулоновского поля ядер, скорости реакций рассчитываются на основе учета резонансных и нерезонансных вкладов, согласно изложению § 13. В [361] приведены соотношения для следующих реакций:

$$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \gamma)^{24}\text{Mg}, \quad Q_6 = 13,931,$$

$$N_A \langle \sigma v \rangle (^{12}\text{C}^{12}\text{C}) = \left\{ 1,26 \cdot 10^{27} T_{9A}^{5/6} T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{84,165}{T_{9A}^{1/3}}\right) \times \right. \\ \left. \times [\exp(-0,010 T_{9A}^4) + 5,56 \cdot 10^{-3} \exp(1,685 T_{9A}^{2/3})]^{-1} \right\} (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}). \quad (15.1)$$

$$T_{9A} = T_9 (1 + 0,067 T_9)^{-1}.$$

Скорость энерговыведения есть

$$\epsilon_{12\text{C}^{12}\text{C}} = 4,67 \cdot 10^{16} x_{12\text{C}}^2 \rho N_A \langle \sigma v \rangle (^{12}\text{C}^{12}\text{C}) \text{ (эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \quad (15.2)$$

Реакция

$$^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, \gamma)^{28}\text{Si}, \quad Q_6 = 16,754,$$

$$N_A \langle \sigma v \rangle (^{12}\text{C}^{16}\text{O}) = 1,72 \cdot 10^{31} T_{9A}^{5/6} T_9^{-3/2} \exp\left(-\frac{106,594}{T_{9A}^{1/3}}\right) \times \\ \times [\exp(-0,180 T_{9A}^2) + 1,06 \cdot 10^{-3} \exp(2,562 T_{9A}^{2/3})]^{-1} (\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}), \\ T_{9A} = T_9 (1 + 0,055 T_9)^{-1} \quad (15.3)$$

дает энерговыведение

$$\epsilon_{12\text{C}^{16}\text{O}} = 8,42 \cdot 10^{16} x_{12\text{C}} x_{16\text{O}} \rho N_A \langle \sigma v \rangle (^{12}\text{C}^{16}\text{O}) \text{ (эрг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}). \quad (15.4)$$